

건축음향잔향실의 확산판 설치 및 음장보정

1. 음의 성질

1.1 음파

음(sound)은 우리의 귀를 통하여 세기(loudness), 높이(pitch), 크기(volume) 등의 특수한 감각, 이른바 청각에 의한 외계의 물리적 자극이다. 즉 음파 또는 음파에 의하여 나타난 청각적 감각이라고 정의할 수 있다. 이 물리적 자극은 매질(기체, 액체, 고체의 어느 것, 일반적으로 탄성체를 말한다)의 빠른 밀도변화인데, 파동현상을 나타내므로 음파라고 불리우고 있다.

이와 같이 음이란 탄성체 중에 전해지는 파의 일종이고, 음파는 관성(질량)과 탄성(탄력)을 가진 매질 중에서 전해진다. 음파가 존재하는 매질공간을 음장(sound field)이라고 한다. 보통 매질은 공기인데, 공기 중 어느 장소에서 발생한 공기입자의 진동이 파급 전파한다. 한쪽 끝을 압축하면 압축·팽창이 교대로 존재하여 전파한다. 이러한 압축·팽창은 공기입자에서 말하면 속도변화에 의하여 발생하는 압력변화이고, 이것을 음압(sound pressure)이라고 한다. 또한 입자가 운동을 전하는 속도를 음속(sound speed), 왕복운동의 속도를 입자속도(particle velocity)라고 한다.

1초간의 왕복운동의 수를 진동 또는 주파수(frequency)라 하고, f [Hz]로 나타낸다. 또한 1초간에 음파가 진행한 거리, 음속을 c [m/s], 음의 파장(wave length)을 λ 로 한다.

1.2 실내 공간의 소리

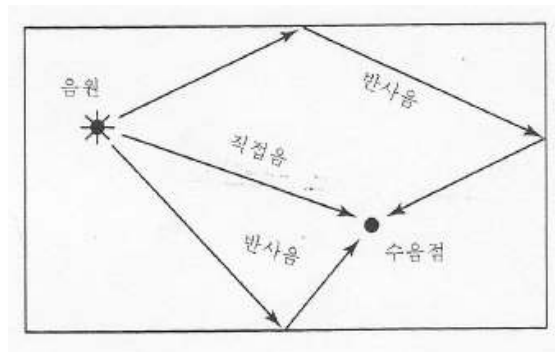
소리가 공간을 전파하는 현상을 그 매질의 특성과 전파하는 공간에 놓여져 있는 여러 종류의 물체의 공간·시간상의 특성에 의하여 지배된다. 여기서 물체의 공간상의 특성이라 함은 물체의 기하학적인 형상, 즉 모양을 의미하며, 시간상의 특성이라 함은 물체가 입사하는 음파의 주파수에 따라 어떠한 진동을 하는가와 관련된 특성을 말한다.

아주 특별한 경우이지만, 어떠한 소리가 실내 공간에서 전파하는 경우를 생각하여 보면, 소리의 전파속도는 실내 공간을 형성하고 있는 매질의 특성에 의하여 결정되겠지만, 그 이외의 전파 특성은 공간을 이루고 있는 벽의 특성(벽의 임피던스)과 공간 자체의 특성에 의하여 결정될 것이다. 결국 전파특성은 공간의 크기와 공간을 형성하는 벽의 주파수별 특성에 의하여 결정된다.

2. 실내 음향의 특성

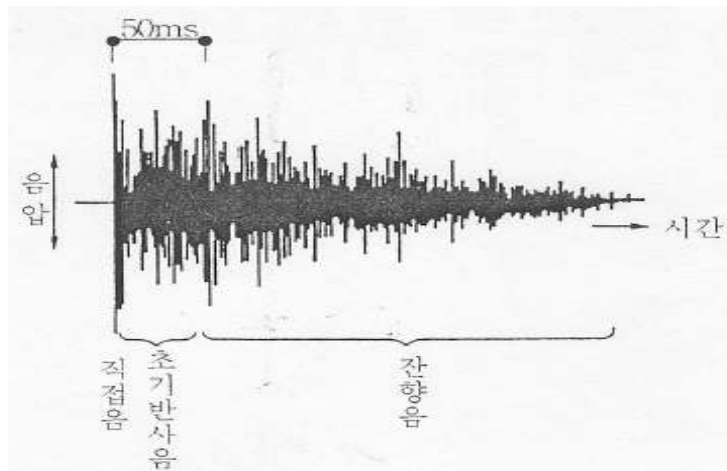
2.1 실내 음의 특징

실내에서 음을 발생하면 수음점에서는 먼저 음원에서 직접 전파하는 직접음(direct sound)이 도래하고, 이어서 벽이나 천장 등에서 반사된 반사음(reflected sound)이 도래한다. 직접음은 전파경로가 가장 짧으므로 최초에 도래하지만, 반사음은 전파경로가 길수록 늦게 도래한다. 따라서 음원을 정지한 후에도 직접음에 이어 여러 경로의 반사음이 순차적으로 도래하고, 이것이 여러 가지 청각적 음향효과를 초래한다. 즉 실내의 음은 선호와 비선호에 상관없이 그 실 고유의 음색을 수반하지 않은 음이 된다. 실내의 음향계획에서는 직접음이나 반사음의 음향효과를 충분히 이해하고 이것이 바람직한 효과가 되도록 계획적으로 제어하는 것이 필요하다.



[그림 1] 실내의 음

이야기 소리나 음악과 같이 연속적으로 발생하는 음을 실내에서 관측한 경우에는 직접음과 반사음을 명확히 분리할 수 없으나 계속시간이 수 ms ~ 수십 ms 정도의 음을 음원으로 하여 수음점에서의 음압을 관찰하면 그림과 같이 직접음과 반사음의 도래의 시간적 변화를 나타낼 수 있다. 이것을 echo time pattern 이라고 한다.



[그림 2] echo time pattern

2.2 직접음과 반사음의 음향효과

(1) 직접음

직접음은 주로 음원의 내용(무슨 음인가)과 방향(음이 어디에서 들리는가)의 정보를 준다. 즉 직접음은 음의 명료도를 높이기 위하여 중요하다.

(2) 초기반사음

직접음에 의하여 약 50 ms(음악에서는 80 ms) 이내에 도래하는 반사음은 직접음과 일체가 되어 들리기 때문에 직접음을 보강하는 효과가 있다. 이것을 초기반사음(early reflection)이라고 한다. 직접음이 충분하지 않은 경우에는 초기반사음을 이용하여 직접음 에너지의 부족을 보완할 필요가 있다.

최근 측면에서 도래하는 초기반사음이 음장의 공간적 인상(spatial impression, 음에 둘러싸인 느

낌)을 좌우하는 것이 밝혀지고, 콘서트 홀의 음향에서는 적절한 측면반사음이 있는 것이 중요하다고 지적되고 있다. 이것은 측면반사음은 좌우의 구에 입사하는 음향신호에 약간의 시간차와 위상차를 초래하기 때문으로 설명되고 있다.

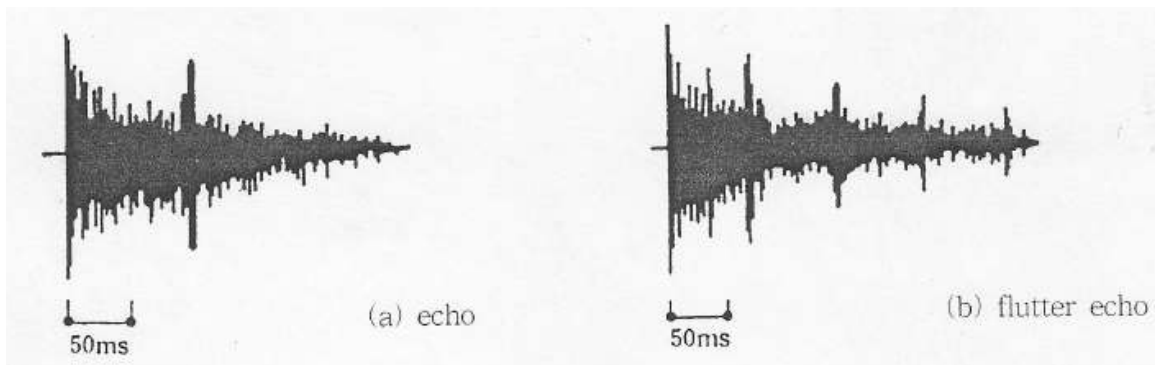
(3) 잔향음

초기반사음보다 늦게 도래하는 반사음은 잔향음(reverberation)이라 하고, 청각적으로는 음의 울림으로 느껴진다. 계속시간이 긴 잔향음은 음에 풍부한 울림을 주고, 잔향음이 적으면 울림은 적은 음이 된다. 음악을 아름답게 듣기 위해서는 적절한 울림이 필요하지만, 잔향음이 지나치게 많으면 음의 명료도가 낮아지기 때문에 이야기 소리에 대해서 잔향음은 적은 편이 바람직하다.

잔향음은 랜덤 위상의 음이 모든 방향에서 도래하는(음이 충분히 확산되고 있다) 것이 중요하다.

(4) 반향

그림과 같이 50 ms ~ 80 ms 이후에 도래하는 반사음 중에 독립한 큰 반사음이 존재하는 경우 그 반사음은 직접음과는 분리되어 들린다, 이것을 반향(echo)라고 한다. 또한 실내에 반사성의 평행벽면이 있어 양벽면의 사이를 음이 반복하여 반사하는 경우 반복 반사음이 관측된다. 이 때 음은 “피치피치...”, “부르부르...” 등과 같이 매우 부자연스러운 울림을 수반한 음이 된다. 이것을 flutter echo라고 한다.



[그림 3] echo와 flutter echo

echo나 flutter echo는 음의 명료도를 현저히 저하시키고, 음성의 청취에서 음악에도 큰 장애가 되므로 실내에서는 이와 같은 현상이 일어나지 않도록 유의하여야 한다.

2.3 잔향시간

직접음과 반사음의 음향효과를 고려하여 바람직한 음향상태를 실현하기 위한 조건을 정리하면,

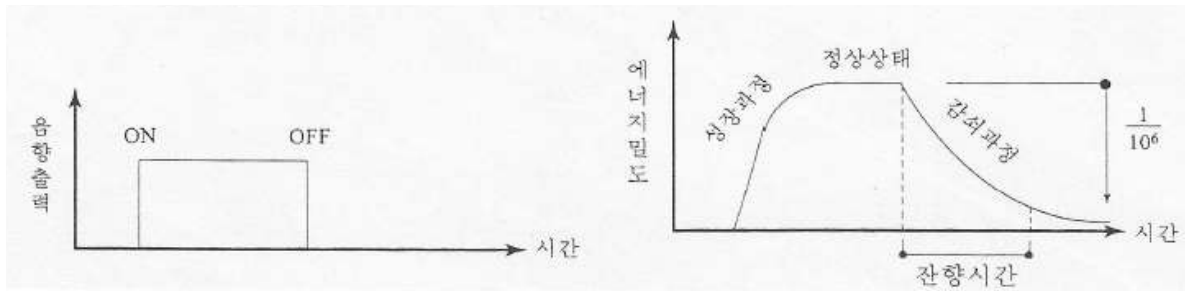
- ① 직접음이 충분한 양으로 들릴 수 있을 것.
 - ② 초기반사음이 직접음을 보강하고 있을 것.
 - ③ 적절한 에너지의 측면반사음이 있을 것.
 - ④ 적절한 잔향이 있을 것.
 - ⑤ echo나 flutter echo 등의 음향장애가 되는 현상이 발생하지 않을 것 이다.
- 음향설계에서는 이들 5가지 조건을 각각 검토할 필요가 있는데, 각 조건은 일반적으로 잔향시간으

로 평가할 수 있다.

이것은 1900년에 W.C.Sabine에 의하여 제안된 것인데, 오늘날에도 실내음향의 기본적 지표로 음향설계에서 소음제어에 이르기까지 모든 건축음향기술에 이용되고 있는 중요한 지표이다.

실내에 있는 음원에서 정상음을 발생하여 실내의 음향 에너지 밀도가 정상상태가 된 후 음원을 정지하면 수음점에서는 음향 에너지 밀도는 지수적으로 감쇠한다.

이때 음향 에너지 밀도가 정상상태일 때의 $1/10^6$ 이 되는(음압레벨은 60 dB 감쇠한다)데 요하는 시간이 잔향시간이다.



[그림 4] 실내의 음의 성장·정상·감쇠과정

잔향시간은 실내가 확산음장이라고 가정하여 구해진 개념이다. 원리적으로 잔향시간의 값은 음원이나 수음점의 위치, 실의 형상, 흡음재의 배치 등에 의하지 않고 일정하게 되는데 실제의 실은 완전한 확산상태는 아니기 때문에 수음점마다 다소 다른 값이 된다.

3. 잔향실험 흡음율 측정방법

잔향실험 흡음율의 측정은 KS F 2805:2009(잔향실험 흡음률 측정방법)에서 규정한 절차에 의하여 잔향실 내에 시험체를 설치하지 않은 상태에서의 잔향시간과 시험체 설치후의 잔향시간을 각각 측정하여 흡음계수 계산식에 의해 산출하는 방법이다.

3.1 잔향시간의 측정

시험설치 전·후의 각 잔향시간 측정을 위한 마이크로폰 위치는 잔향실 내 마이크로폰 상호간 1.5 m 이상 이격되고, 시험체면 및 벽면으로부터는 1 m 이상, 음원으로부터 2 m 이상 이격되는 5개 지점에서 측정하도록 한다.

3.2 빈 잔향실의 등가흡음면적(A_1)

빈 잔향실의 잔향시간을 측정하여 빈 잔향실에서의 등가흡음면적 $A_1(m^2)$ 은 식 (1)로 산출한다.

$$A_1 = \frac{55.3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad \text{-----} \quad (1)$$

- 여기에서
- V : 빈 잔향실 용적(m^3)
 - c : 공기 중 음속 [$c = (331 + 0.6t/^\circ C)$, m/s]
 - T_1 : 빈 잔향실에서의 잔향시간(s)
 - m_1 : 빈 잔향실에서의 파워감쇠계수(m^{-1})
- ($m = \alpha/10 \log(e)$, α : 대기압에서의 흡음감쇠계수)

3.3 시편을 포함한 잔향실의 등가흡음면적(A_2)

시편을 포함한 잔향실의 잔향시간(20회)을 측정하여 시편을 포함한 잔향실의 등가 흡음 면적 A_2 (m^2)는 식 (2)로 산출한다.

$$A_2 = \frac{55.3V}{cT_2} - 4Vm_2 \text{ ----- (2)}$$

여기에서 T_2 : 시편을 설치한 후 잔향실에서의 잔향시간(s)
 m_2 : 빈 잔향실에서의 파워감쇠계수(m^{-1})
($m = \alpha/10 \log(e)$, α : 대기압에서의 흡음감쇠계수)

3.4 시편의 등가흡음면적(A_T)

시편을 포함한 잔향실의 등가흡음면적 $A_T(m^2)$ 는 식 (3)으로 산출한다.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \text{ ----- (3)}$$

여기에서 c_1 : 온도 t_1 일 때의 음속
 c_2 : 온도 t_2 일 때의 음속

3.5. 흡음계수(α_s)

평면 흡음체 혹은 흡음체의 배열에 의한 흡음계수 α_s 는 식 (4)로 산출한다.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \text{ ----- (4)}$$

여기에서 A_T : 시편의 등가흡음면적(m^2)
 S : 시편으로 덮여지는 면적(m^2)

3.6 측정주파수

100 Hz ~ 5000 Hz의 1/3 Octave 대역

3.7 측정기기

1) 음원 : 증폭기 및 스피커(1/3 Octave 대역소음, B&K 4296)



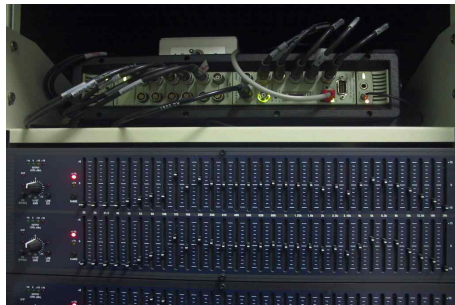
[그림 5] 음원

2) 마이크로폰 : 무지향 특성을 가진 것(B&K 4942)



[그림 6] 마이크로폰

3) 음압레벨측정기 : 실시간 주파수 분석기(B&K Pulse)



[그림 7] 실시간 주파수 분석기

4. 잔향실에서의 음장의 확산

잔향실에서 확산되는 음장은 충분히 확산적이어야 한다. 잔향실 형사에 관계없이 확산을 만족하기 위해서는 정지된 혹은 매달린 확산체 혹은 회전날개형 확산판이 일반적으로 필요하다.

4.1 확산체

확산은 고정된 확산체나 회전 날개를 사용하여 얻을 수 있다. 이상적으로는 이러한 확산 요소들은 낮은 흡음율과 단위 면적당 질량이 약 5 kg/m^2 되는 판재이면 된다. 약 0.8 m^2 부터 3 m^2 되는 면적을 가지는 서로 다른 크기의 확산체들의 사용을 권장한다. 확산판은 약간 굴곡지게 설치할 수도 있고 그리고 잔향실내에 랜덤하게 골고루 설치한다.

4.2 확산성 검사

적절한 시험 시편, 예를 들어 5 cm에서 10 cm 두께의 시편으로 균질하고 기공성인 흡음성 물질로서 최적의 조건 하에서 500 Hz에서 4000 Hz의 주파수 영역에서 0.9 이상의 흡음계수를 가지는 물질을 선택한다.

다음의 조건에 대해 시편의 흡음력을 측정한다.

- 1) 확산체가 없는 경우
- 2) 몇 개의 고정 확산체(약 5 m²의 면적)를 설치한 경우
- 3) 고정 확산체의 수를 5 m² 면적 씩 단계별로 증가시켜 가면서 각 측정에 대해 주파수 500 Hz에서 4000 Hz의 영역에서 흡음계수의 평균값을 계산하고 각 경우에 사용된 확산체의 수에 대해 그려진다. 확산체 수의 증가에 따라 흡음계수의 평균값이 최고점에 달하고 그 후에는 일정한 값을 가지는 것을 볼 수 있게 되며, 최적의 확산체의 수는 흡음계수 값이 일정할 때가 된다.



[그림 8] 확산판의 설치 예

5. 건축음향간향실의 확산판 설치 및 음장조정

5.1 확산판 설치 및 음장 조정 방법

- 1) 간향실 상부 확산판 설치 개수 변화에 흡음계수 측정
- 2) 간향실 상부 확산판 설치 개수 조정 및 음원의 음장 조정
- 3) 기존 숙련도 참여 기관과의 흡음계수 비교

5.2 표준 시험체

폴리에스테르 흡음재(3 m × 4 m × 50 mm, 비교숙련도 시험체)

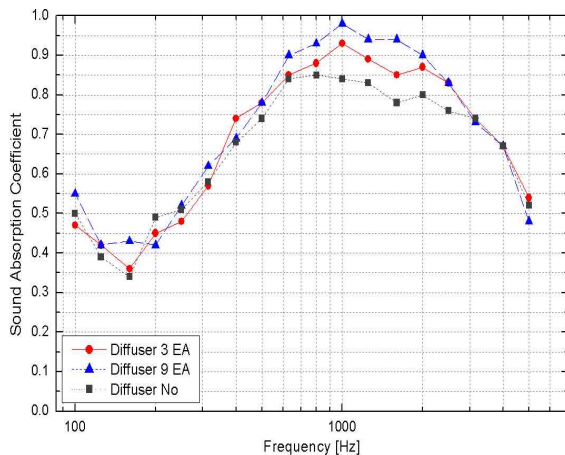
5.3 확산판의 변화에 따른 흡음계수 측정 결과

고정 확산판의 수를 5 m² 면적 씩 단계별로 증가시켜 가면서 각 측정에 대해 주파수 100 Hz에서 5000 Hz의 영역에서 흡음계수의 평균값을 계산한 결과는 <표 1> 과 같다.

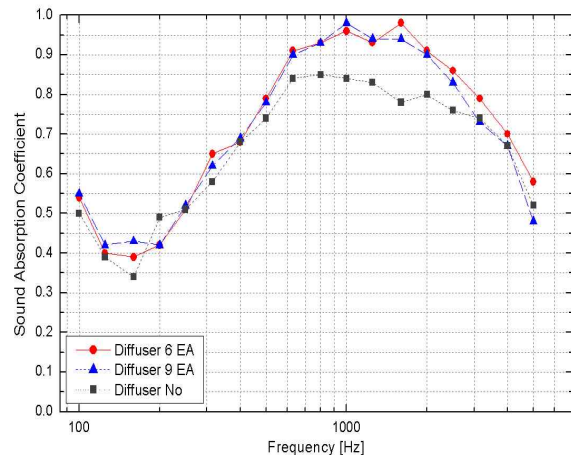
<표 1> 확산판의 설치에 따른 흡음계수

주파수 (Hz)	흡음계수 측정 결과							
	0개	3개	6개	8개	9개	10개	12개	14개
100	0.50	0.47	0.54	0.57	0.55	0.53	0.52	0.37
125	0.39	0.42	0.40	0.42	0.42	0.41	0.37	0.32
160	0.34	0.36	0.39	0.44	0.43	0.42	0.39	0.37
200	0.49	0.45	0.42	0.39	0.42	0.45	0.44	0.42
250	0.51	0.48	0.51	0.52	0.52	0.52	0.46	0.44
315	0.58	0.57	0.65	0.62	0.62	0.61	0.60	0.60
400	0.68	0.74	0.68	0.69	0.70	0.70	0.69	0.66
500	0.74	0.78	0.79	0.79	0.78	0.77	0.79	0.78
630	0.84	0.85	0.91	0.91	0.91	0.90	0.88	0.89
800	0.85	0.88	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94	0.92
1000	0.84	0.93	0.96	0.98	0.98	0.98	0.99	0.97
1250	0.83	0.89	0.93	0.95	0.95	0.94	0.97	0.95
1600	0.78	0.85	0.98	0.94	0.95	0.95	1.01	0.94
2000	0.80	0.87	0.91	0.89	0.90	0.90	0.98	0.90
2500	0.76	0.83	0.86	0.85	0.84	0.82	0.96	0.88
3150	0.74	0.74	0.79	0.77	0.74	0.70	0.89	0.82
4000	0.67	0.67	0.70	0.72	0.67	0.62	0.81	0.74
5000	0.52	0.54	0.58	0.47	0.48	0.49	0.67	0.60
NRC	0.72	0.77	0.79	0.80	0.80	0.79	0.81	0.77

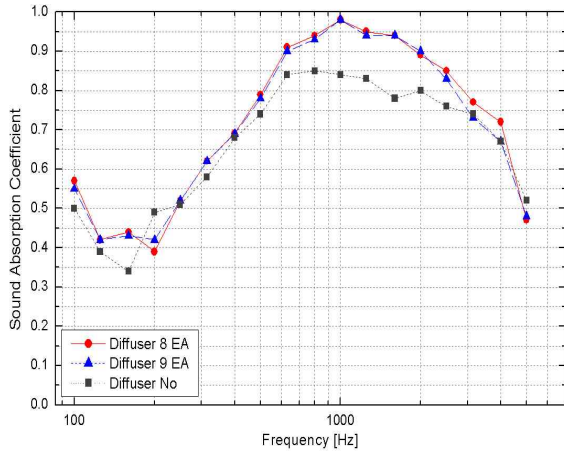
확산판 개수를 증가시키면서 표준 시험체의 흡음계수를 비교한 결과 확산판을 9개 설치한 경우 가장 안정적인 값이 나타났으며, KS F 2805에 규정되어 있는 빈 잔향실의 흡음력을 만족할 수 있었다. 따라서 확산판을 9개로 선정하고 각 확산판의 위치, 각도 등을 조정하여 잔향실 음장을 조정하였다.



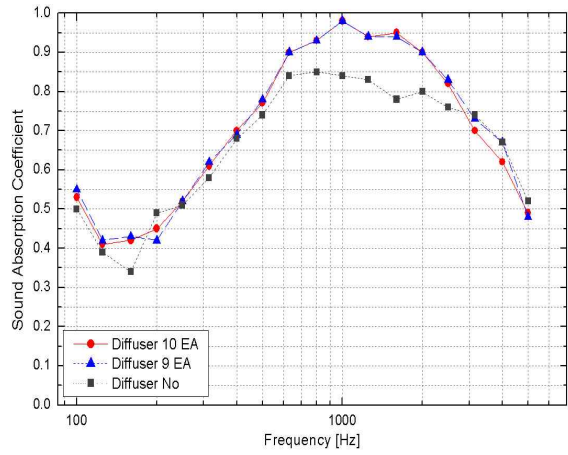
[그림 9] 확산판 3개 설치시 흡음계수 비교



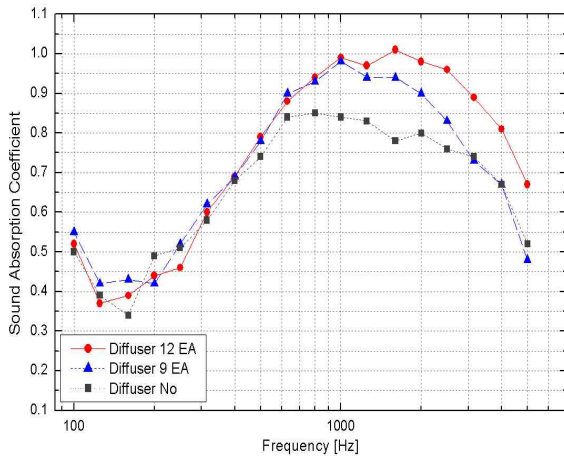
[그림 10] 확산판 6개 설치시 흡음계수 비교



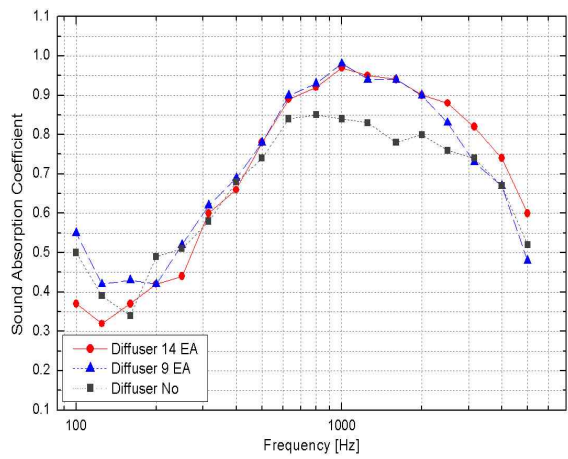
[그림 11] 확산판 8개 설치시 흡음계수 비교



[그림 12] 확산판 10개 설치시 흡음계수 비교



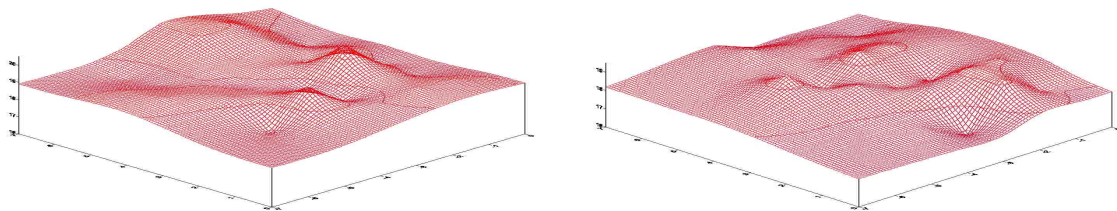
[그림 13] 확산판 12개 설치시 흡음계수 비교



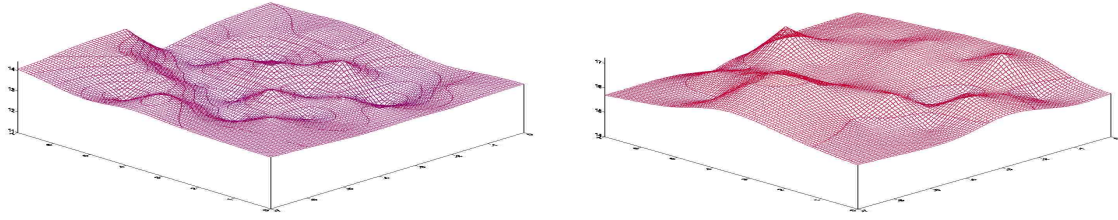
[그림 14] 확산판 14개 설치시 흡음계수 비교

5.4 음장 조정

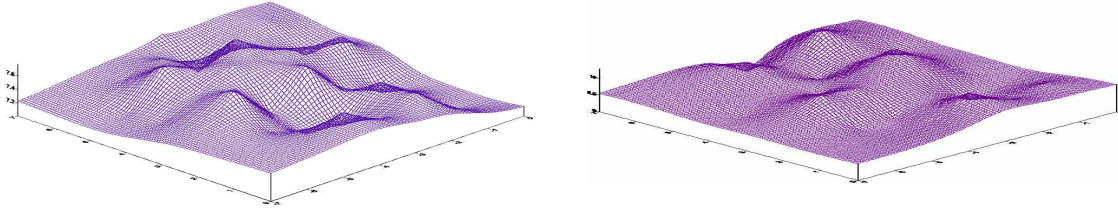
확산판을 설치한 후 건축음향잔향실의 전체 음장을 측정하여 확산판의 위치 및 각도에 따라 가장 고르게 음장이 분포되는 위치와 각도를 지정하였다. 아래의 그림은 설치 전·후의 음장변화를 나타낸다.



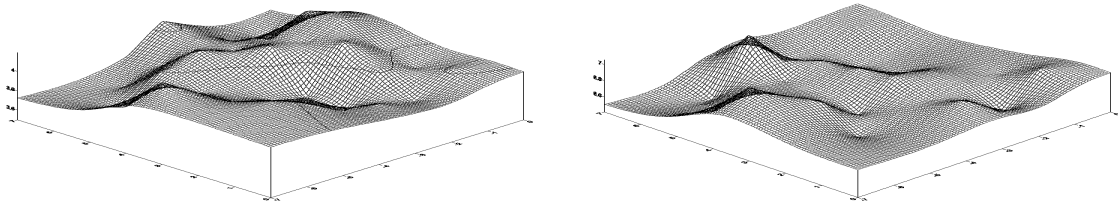
[그림 15] 확산판 설치 전·후의 음장 비교(250 Hz)



[그림 16] 확산판 설치 전·후의 음장 비교(500 Hz)

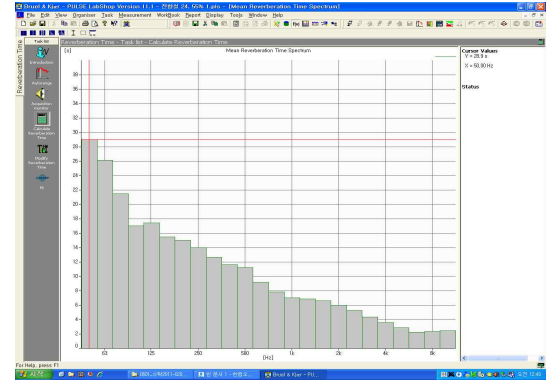
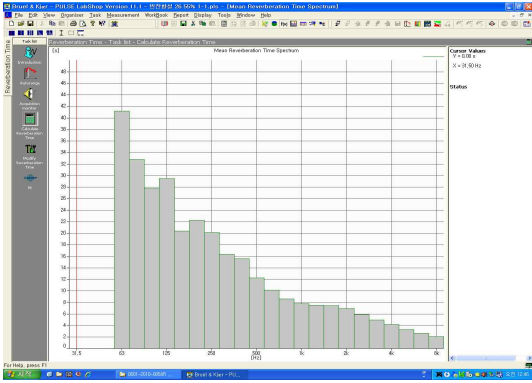


[그림 17] 확산판 설치 전·후의 음장 비교(1000 Hz)

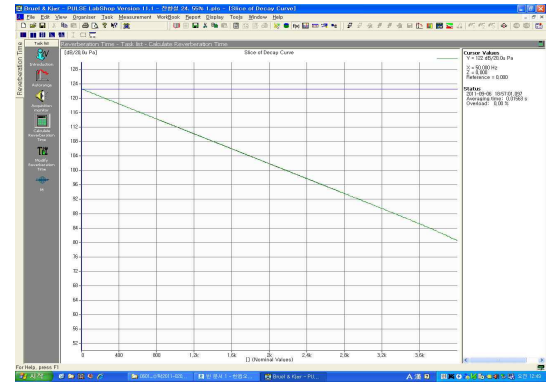
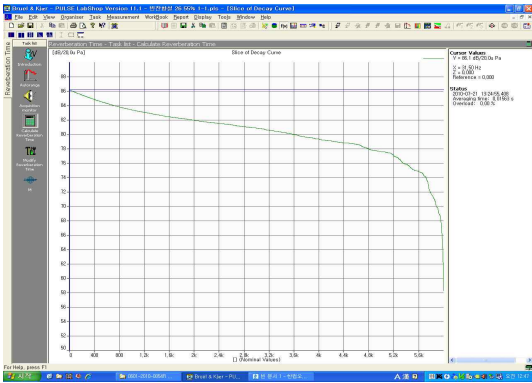


[그림 18] 확산판 설치 전·후의 음장 비교(2000 Hz)

주요 주파수 별 설치 전·후의 음장을 비교한 결과 설치 후에 건축음향잔향실 내부의 음장이 고르게 분포되며 안정화된 것을 알 수 있다. 아래의 그림은 전체적인 흡음계수와 decay curve의 변화를 나타낸 것으로 설치 후 안정화됨을 보여주고 있다.



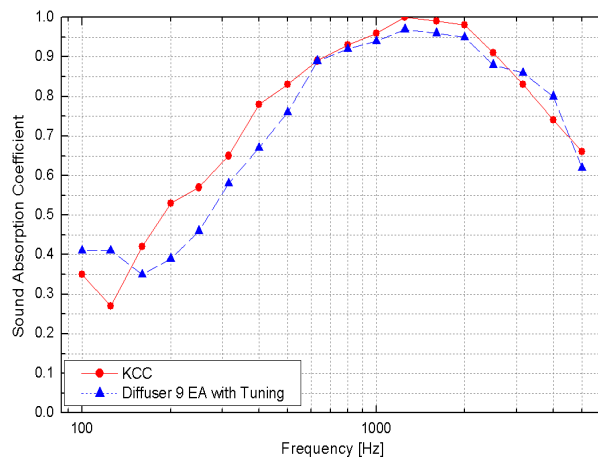
[그림 19] 확산판 설치 전·후의 흡음계수



[그림 20] 확산판 설치 전·후의 decay curve

5.5 비교속련도 참가 기관과의 비교를 통한 신뢰성 검증

음장이 최종 조정된 조건에서 표준 시험체를 설치하여 과거 동일한 시험체를 비교속련도 시험을 실시하였던 KCC 중앙연구소의 흡음계수 값(비교속련도 시험결과 표준과학연구원의 흡음계수 값과 상당한 유사성을 나타냈다)과 비교하였다. 비교 결과 확산판 설치 이후 표준 시험체의 500 Hz 이상 대역의 흡음계수가 유사하게 측정되었으며, 500 Hz 이하 대역의 값은 표준 시험체의 경년변화 및 경년변화에 따른 셀의 막힘 등에 의한 영향으로 판단된다.



[그림 21] 확산판 설치 후 표준 시험체를 통한 비교

다만 검증하지 못한 저주파수 대역에 대하여는 지속적인 데이터의 확보 및 유사 기관과의 비교 시험을 통해 얻은 결과를 토대로 추가적인 보정 및 검증이 필요하다.